

ارزیابی خواص اتصال فولاد زنگ‌نزن دوفازی UNS S32205 به فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI 316L با استفاده از فرایند جوشکاری قوسی تنگستن تحت گاز محافظ پالسی

رضا نیسی^{۱*}، مرتضی شمعیان^۲

۱- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

۲- استاد، عضو هیئت علمی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

*Reza.neissi1367@gmail.com

(تاریخ دریافت: ۹۲/۰۷/۰۳، تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۲/۲۰)

چکیده

در این تحقیق به بررسی خواص اتصال غیر مشابه فولاد زنگ‌نزن دوفازی ۲۲۰۵ به فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۱۶L با استفاده از فلز پرکننده زنگ‌نزن دوفازی ER 2209 پرداخته شده است. به این منظور سه نمونه با سه حرارت ورودی مختلف جهت ارزیابی تاثیر حرارت ورودی در این اتصال با استفاده از فرایند جوشکاری قوسی تنگستن تحت گاز محافظ پالسی انجام شد. از آزمون‌های متالوگرافی نوری، میکروسکوپ الکترونی، فریت سنجی و پلاریزاسیون سیکلی استفاده شد. بررسی تصاویر میکروسکوپ نوری و الکترونی حضور فازهای نیتريد کروم در منطقه متأثر از حرارت فولاد زنگ‌نزن دوفازی را نشان داد که نمونه با کمترین حرارت ورودی بالاترین مقدار نیتريد کروم را دارا بود ولی فاز سیگما در نمونه با حرارت ورودی بالا مشاهده نشد. نتایج فریت سنجی در پاس‌های مختلف تغییر نسبت دو فاز آستنیت و فریت در پاس‌های مختلف را نشان داد. همچنین نتایج آزمون پلاریزاسیون سیکلی نمونه با حرارت ورودی بالا را به عنوان مقاوم‌ترین نمونه در برابر خوردگی حفره‌ای معرفی نمود.

واژه‌های کلیدی:

فولاد زنگ‌نزن دوفازی، حرارت ورودی، پلاریزاسیون سیکلی، نیتريد کروم.

۱- مقدمه

فولادها به طور کلی بسیار جوش‌پذیر تلقی می‌شوند ولی از جهتی دیگر مشکلاتی از قبیل ترک گرم و پدیده حساس شدن در فلز جوش و منطقه متأثر از حرارت این فولادها به وجود می‌آید که برای حل این مشکل استفاده از نوع کم کربن از قبیل ۳۱۶L و ۳۰۴L در جوشکاری رواج پیدا کرده است [۲-۵]. فولادهای زنگ‌نزن دوفازی نام خود را از ریز ساختارشان در

فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی بزرگ‌ترین گروه فولادهای زنگ‌نزن می‌باشند که در این راستا فولادهای ۳۱۶ و ۳۰۴ پر مصرف ترین مواد از این گروه از خانواده فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی می‌باشند [۱]. فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی دارای کاربردهای فراوان در محیط‌های خوردنده می‌باشند ولی اغلب در محیط‌های خوردنده با خوردندگی کم مورد استفاده قرار می‌گیرند. این

دمای حفره دار شدن افزایش می‌یابد که ناشی از تناسب بهتر فازهای آستنیت-فریت می‌باشد [۷].

لبانوسکی و همکاران فولاد زنگ‌نزن دوفازی ۲۲۰۵ را به فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۱۶L به وسیله روش جوشکاری قوسی تنگستن تحت گاز محافظ جوشکاری کردند. آنها دریافتند که ترک خوردن خوردگی تششی در منطقه متاثر از حرارت فولاد ۲۲۰۵ رخ داده است و این امر را ناشی از به هم ریختن تناسب فازهای آستنیت و فریت توجیه کردند، همچنین دریافتند که بیشترین حساسیت به این نوع خوردگی در نمونه با بیشترین مقدار فریت رخ می‌دهد [۸]. وانگ و همکاران فولاد زنگ‌نزن دوفازی را به وسیله دو فرایند جوشکاری قوسی تنگستن تحت گاز محافظ معمولی و پالسی جوشکاری کردند. آنها دریافتند که افزایش نرخ سرد شدن نسبت آستنیت و فریت به سمت نسبت مساوی میل کرده است که این امر را از طریق تشکیل فازهای آستنیت ویدمن اشتاتن و درون دانه‌ای توجیه کردند، لذا توجیه کردند که نسبت مساوی دو فاز آستنیت-فریت به وسیله فرایند جوشکاری قوسی تنگستن تحت گاز محافظ پالسی به سمت مساوی میل کرده و دلیل آن نرخ سرد شدن بالاتر این فرایند جوشکاری است [۹]. یوسفیه و همکاران فولادهای دوفازی ۲۵۰۷ را به وسیله فلز پرکننده ERY۲۵۹۴ به روش جوشکاری قوسی تنگستن تحت گاز محافظ پالسی جوشکاری کردند. آنها توانستند مشخص کنند که این روش جوشکاری توانایی به سزایی در به وجود آوردن ساختار مساوی آستنیت-فریت و عاری از رسوبات نیتريدی و فاز سیگما دارد [۶]، همچنین توانستند از طریق روش آماری تاگوچی به حالت بهینه متغیرهای پالسی با بهترین پتانسیل حفره‌دار شدن دست یابند که مقدار حرارت ورودی بهینه برابر ۰/۹۵ کیلوژول بر میلیمتر بوده است [۱۰].

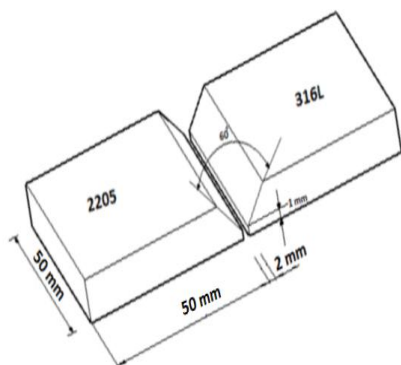
در بسیاری از مراجع حرارت ورودی مناسب جهت اتصال فولادهای زنگ‌نزن دوفازی از ۰/۵ تا ۲ کیلوژول بر میلیمتر اشاره شده است، لذا در این پژوهش تصمیم شد تاثیر سه حرارت ورودی ۰/۷۳۵، ۰/۹۵۷ و ۱/۳۰۹ کیلوژول بر میلیمتر

دمای محیط که نیمی فریت و نیمی آستنیت است، برگرفته‌اند. این فولادها دارای مقاومت به حفره دار شده بسیار خوب در محیط های خورنده کلری می‌باشند و از طرفی دیگر نیز استحکام بالاتری نسبت به فولادهای زنگ نزن آستنیتی دارند. بهترین خواص مکانیکی و خوردگی این فولادها به نسبت مساوی از دو فاز فریت و آستنیت وابسته است به گونه‌ای ساختار ۵۰٪ آستنیت و ۵۰٪ فریت بهترین مقاومت به حفره دار شدن و استحکام بالایی را سبب می‌شود. کنترل حرارت ورودی در جوشکاری این فولادها اهمیت بالایی دارد زیرا در حرارت ورودی پایین مقدار فاز فریت زیاد شده و ترکیبات نیتريدی در زمینه فریت تشکیل می‌شود و در حرارت ورودی بالا مقدار آستنیت زیاد شده و ترکیبات ترد و شکننده از قبیل فاز سیگما مشاهده خواهد شد. اتصال فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی به فولادهای زنگ نزن دوفازی در محیطهای دریایی، صنایع شیمیایی و نفت و گاز کاربرد فراوان دارد [۲].

اتصال قطعات با استفاده از فرایند جوشکاری قوسی تنگستن تحت گاز محافظ در بسیاری از صنایع ضروری شده است زیرا این روش کیفیت بسیار بالایی را در اتصال فراهم می‌کند. روش جوشکاری قوسی تنگستن تحت گاز محافظ پالسی (PCGTAW) به عنوان یک پیشرفت در روش جوشکاری قوسی تنگستن تحت گاز محافظ (CCGTAW) مطرح است. این روش نسبت به روش جوشکاری CCGTAW حرارت ورودی کمتری به قطعات جوشکاری شده وارد می‌کند لذا از سوختن ورق‌های نازک جلوگیری کرده و همچنین منطقه متاثر از حرارت کوچکی در قطعات تشکیل می‌دهد [۶]. در ذیل به پاره ای از تحقیقات پیشین در تاثیر میزان حرارت ورودی و نرخ سرمایش در اتصالات فولادهای زنگ‌نزن دوفازی اشاره شده است.

چن و همکاران منطقه متاثر از حرارت فولاد زنگ‌نزن دوفازی را به وسیله عملیات حرارتی شبیه سازی کردند. آنها دریافتند که با افزایش نرخ سرمایش، مقدار فاز آستنیت افزایش یافته ولی در نمونه‌های با نرخ سرمایش کمتر فاز آستنیت ضخیم تر می‌شود. آزمون دمای حفره‌دار شدن نشان داد با افزایش نرخ سرمایش،

بر خواص این اتصال مورد بررسی قرار گیرد.



شکل (۱): طرح اتصال فولاد زنگ‌نزن دوفازی ۲۲۰۵ به فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۱۶L

جدول (۲): شرایط جوشکاری فولاد زنگ‌نزن دوفازی ۲۲۰۵ به فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۱۶L

نمونه	I_p (A)	I_b (A)	% on time	Fr (Hz)	حرارت ورودی (kJ/mm)
A	۱۳۰	۴۵	۵۰	۱۰	۰/۷۳۵
B	۱۳۰	۸۵	۶۴	۱/۵	۰/۹۵۷
C	۱۷۰	۸۵	۸۴	۳/۵	۱/۳۰۹

به منظور بررسی های متالوگرافی نوری از میکروسکوپ Optika استفاده شد. به این منظور نمونه های جوشکاری شده به وسیله سنباده های ۶۰ تا ۳۰۰۰ و پس از آن به وسیله خمیر الماسه با ذرات ۲۰ میکرون و خمیر الماسه با ذرات ۱/۵ میکرون ساییده شدند. نمونه ها به منظور نمایان شدن فاز سیگما به وسیله الکترواچ با اختلاف پتانسیل ۵ ولت و زمان ۱۵ ثانیه در محلول KOH(100 CC H₂O + 15 gr KOH) و به منظور بررسی فازهای نیتزیدی در فلز جوش و مناطق متأثر از حرارت به وسیله الکترواچ در محلول اسید اگزالیک ۱۰٪ با اختلاف پتانسیل ۶ ولت و زمان ۷۰ ثانیه غوطه‌ور شدند. همچنین اچ عمومی ریزساختار به وسیله محلول اچ گلیسرژیا + 15CC Glycerol (20CC HCl + 5 CC HNO₃) در زمان غوطه‌وری ۵۰ ثانیه انجام شد.

۲- مواد و روش تحقیق

در این تحقیق از ورق های فولاد زنگ‌نزن دوفازی ۲۲۰۵ و فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۱۶L با ضخامت ۱۰ میلیمتر و فلز پرکننده زنگ‌نزن دوفازی ER2209 با قطر ۱/۶ میلیمتر استفاده شد، که جدول شماره ۱ ترکیب شیمیایی این مواد را نشان می دهد. روش جوشکاری قوسی تنگستن تحت گاز محافظ پالسی با استفاده از گاز آرگون با خلوص ۹۹/۴٪، دمای بین پاسی ۷۰ درجه سانتیگراد با سه حرارت ورودی مختلف بر این اتصال اعمال شد.

جدول(۱): ترکیب شیمیایی مواد مصرفی (بر حسب درصد وزنی)

مواد	Fe	C	N	Mo	Mn	Ni	Cr
۳۱۶L	Bal.	۰/۰۱	-	۲	۱/۷	۱۰/۱	۱۶/۸
۲۲۰۵	Bal.	۰/۰۲	۰/۱۸	۳/۷	۱	۵/۲	۲۲/۲
ER2209	Bal.	۰/۰۱	۰/۱۵	۳/۲	۱/۷	۸/۸	۲۲/۶

حرارت ورودی برای این روش جوشکاری، از رابطه شماره ۱ محاسبه شد. در این رابطه V اختلاف پتانسیل (volte)، S سرعت جوشکاری (cm/min)، I_{av} برای روش PCGTAW برابر شدت جریان متوسط است که از رابطه شماره ۲ محاسبه خواهد شد و η برابر توان روش جوشکاری که برای PCGTAW برابر ۰/۶ می‌باشد. جدول شماره ۲ شرایط جوشکاری و شکل شماره ۱ طرح اتصال را به نشان داده است.

$$[H.I = \eta \times \frac{I_{av} \times V}{S}] \quad (1)$$

$$[I_{av} = \frac{(I_p \times t_p) + (I_b \times t_b)}{(t_b + t_p)}] \quad (2)$$

I_{av} (A) شدت جریان متوسط، I_p (A) شدت جریان پالس، t_p (Sec) زمان پالس، I_b (A) شدت جریان زمینه، t_b (Sec) زمان زمینه [۸].

جدول (۳): مقادیر تشبیه شده ریزدانه‌گی

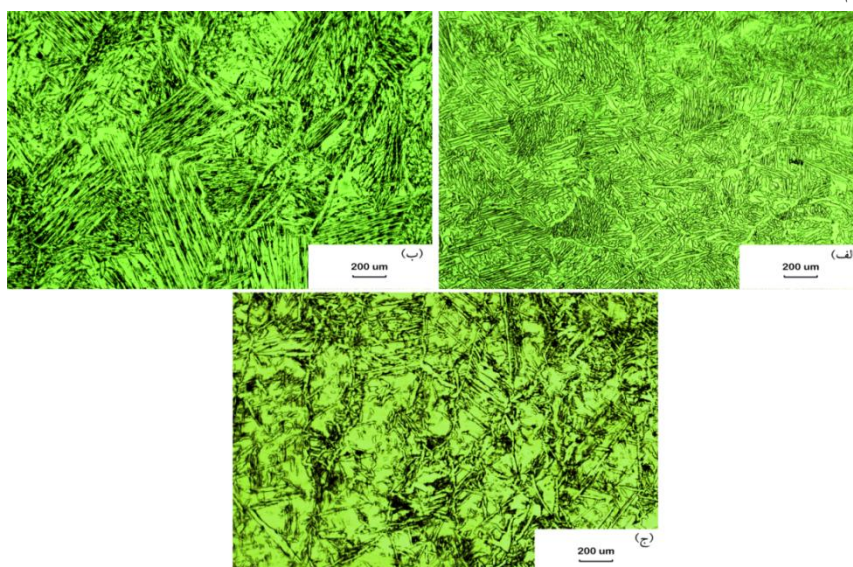
نمونه	امتیاز ریزدانه‌گی بر اساس فرکانس (مقادیر فرکانس)	امتیاز ریزدانه‌گی بر اساس نرخ سرمایش (بالاترین نرخ سرمایش = ۱)	امتیاز کلی ریزدانه‌گی (مجموع امتیاز فرکانس و امتیاز نرخ سرمایش)
A	۱۰	۱	۱۱
B	۱/۵	۲	۳/۵
C	۳/۵	۳	۶/۵

۳- نتیجه گیری و بحث

۳-۱- بررسی‌های ریزساختاری

شکل ۲ تصویر متالوگرافی پاس رویه نمونه‌ها را نشان داده است. با توجه به شکل ملاحظه می‌شود آستنیت‌های تشکیل شده در این نمونه‌ها از نوع مرزدانه‌ای، درون‌دانه‌ای و ویدمن‌اشاتن می‌باشد. از نظر رابطه تشکیل با نرخ سرمایش آستنیت درون‌دانه‌ای نیازمند بالاترین نرخ سرمایش و آستنیت مرزدانه‌ای نیازمند کمترین نرخ سرمایش جهت تشکیل است [۹]. ملاحظه می‌شود نمونه A با بالاترین نرخ سرمایش حاوی مقادیر زیادی آستنیت درون‌دانه‌ای است و نمونه C با نرخ سرمایش پایین دارای آستنیت‌های مرزدانه‌ای به عنوان فاز غالب می‌باشد و نمونه B که با نرخ سرمایش متوسط سرد شده است دارای فاز غالب آستنیت ویدمن‌اشاتن می‌باشد.

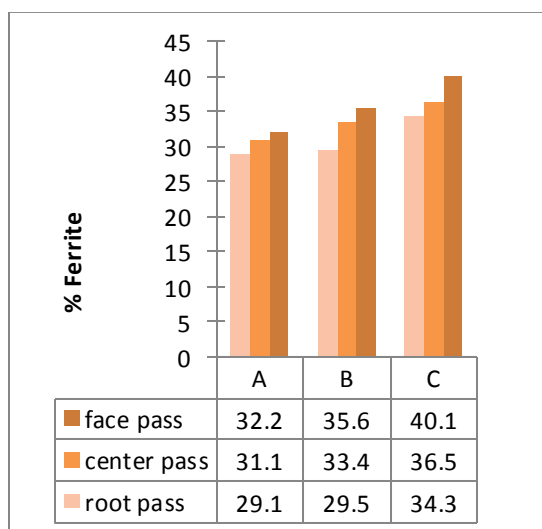
برای بررسی بیشتر فازهای سیگما و نیتریدها در فلزجوش و مناطق متأثر از حرارت از میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM/EDS، Mira Tescan و به منظور سنجش فریت فلز جوش از فریت اسکوپ MP30 و به منظور سنجش فریت منطقه متأثر از حرارت از نرم افزار 3 Image tools استفاده شد. به منظور بررسی مقاومت به حفره دار شدن و تعیین Epit، آزمون پلاریزاسیون سیکی در محلول NaCl ۰.۳٪ با استفاده از دستگاه Parstat 2207 انجام شد. این آزمون به روی پاس ریشه با سطح (۳ × ۴ میلی متر) انجام شد. نمونه‌ها برای این آزمون به وسیله لاک عایق چندین بار پوشش داده شدند تا سطح اضافی نمونه در معرض محلول خورنده قرار نگیرد. نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت در محلول قرار داده شدند تا به حالت تعادل برسند و آزمون با سرعت اسکن 1 mv/sec، پتانسیل ۲۰۰- تا ۱۱۰۰ میلی ولت نسبت به نقطه OCP انجام شد.



شکل (۲): تصویر متالوگرافی نوری: (الف): نمونه A، (ب): نمونه B و (ج): نمونه C

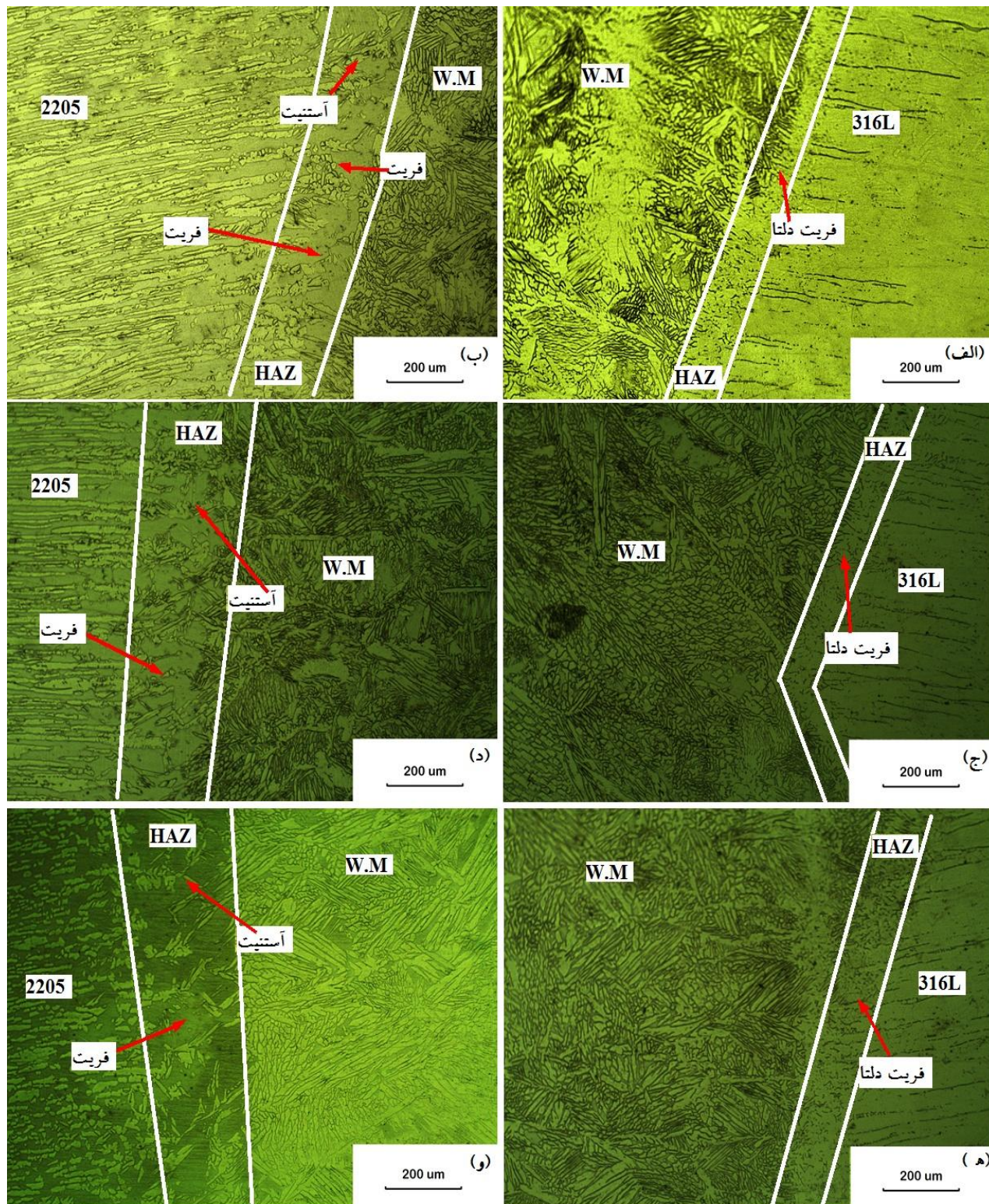
جوشکاری حرارت ورودی عامل دوم در تناسب فازی بوده و عامل کلیدی فرکانس بوده است [۹].

نتایج فریت سنجی با فریت اسکوپ در نمونه‌های A، B و C در شکل ۳ آورده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود مقدار آستیت در پاس‌های ریشه بالاترین مقدار و در پاس‌های رویه کمترین مقدار بوده است و پاس‌های مرکزی مقداری مابین پاس رویه و پاس ریشه بوده است. پاس ریشه متحمل بالاترین حرارت ورودی ناشی از پاس‌های بعدی دارد، لذا آستیت‌هایی از قبیل آستیت ثانویه در این پاس تشکیل می‌شود و همچنین در این پاس به دلیل حرارت ورودی بالا آستیت‌های موجود در مرز دانه فرصت رشد یافته و ضخیم‌تر خواهند شد که مقدار آستیت را نسبت به پاس رویه بیشتر خواهند کرد. پاس‌های مرکزی نیز با چنین مکانیزمی مقدار آستیت موجود در خود را افزایش می‌دهند و در پاس رویه با کمترین حرارت ورودی نه پدیده ضخیم شدن آستیت‌ها و نه تشکیل آستیت‌های ثانویه مطرح است، لذا بدیهی است که مقدار آستیت پاس رویه کمترین مقدار باشد [۹].



شکل (۳): مقادیر فریت موجود در پاس‌های مختلف نمونه‌های A، B و C

لازم به ذکر است که با افزایش مقدار حرارت ورودی نرخ سرمایش نمونه کاهش و با کاهش حرارت ورودی، نرخ سرمایش نمونه کاهش می‌یابد [۱، ۸، ۹، ۱۰]. با توجه به شکل ۲ ملاحظه می‌شود نمونه A با نرخ سرمایش زیاد حاوی مقادیر بالایی آستیت می‌باشد و از طرفی نمونه C با نرخ سرمایش پایین دارای مقادیر کمتری آستیت می‌باشد که این امر با توجه به نفوذی بودن تشکیل آستیت از فاز فریت بعد از انجماد تضاد دارد. این امر نشان می‌دهد در این اتصال مانند مشاهدات وانگ [۹]، فلز جوش زنگ‌نزن دوفازی تحت تاثیر حرارت ورودی استحاله فازی نداشته و عامل دیگری در این تحول اثر گذار بوده است چرا که نتیجه معکوسی در اثر تغییر حرارت ورودی مشاهده شده است. جوشکاری قوسی تنگستن تحت گاز محافظ پالسی اثر مشهودی بر ریز دانگی فلز جوش دارد با افزایش فرکانس در این فرایند جوشکاری، تعداد ضربات وارده به فلز جوش در اثر ضربان قوس افزایش می‌یابد به گونه ای که در نمونه A در هر ثانیه ۱۰ ضربه از قوس الکتریکی به فلز جوش وارد شده است که این مقادیر در فلز جوش نمونه‌های B و C به ترتیب برابر ۱/۵ و ۳/۵ ضربه در هر ثانیه بوده است لذا از نظر ریزدانگی بر اساس فرکانس، نمونه A ریزدانه ترین و نمونه‌های B و C به ترتیب بعد از آن قرار می‌گیرند [۶]. از طرف دیگر جریان پالس و زمینه و مقدار on time به روی نرخ سرمایش اثر بسزایی دارند به این صورت که افزایش نرخ سرمایش سبب ریزدانگی بیشتر فلز جوش خواهد شد لذا به نظر می‌رسد تعادل فازی در این اتصال حاصل تعاملات مشترک فرکانس و نرخ سرمایش بوده است. جدول ۳ امتیاز ریزدانگی با توجه به فرکانس و نرخ سرمایش را نشان داده است. با توجه به جدول ۳ مشخص می‌شود ریز دانه ترین حالت نمونه A و بعد از آن به ترتیب نمونه‌های C و B قرار دارند. با توجه به اینکه تشکیل آستیت از فریت استخاله ای نفوذی می‌باشد تشکیل فازهای ثانویه (آستیت) در فلزات ریزدانه به دلیل افزایش مکان‌های جوانه زنی افزایش می‌یابد که این امر ناشی از کاهش فاصله نفوذ در فلزات ریز دانه است. لذا نتیجه حاصل نشان داد که در روش

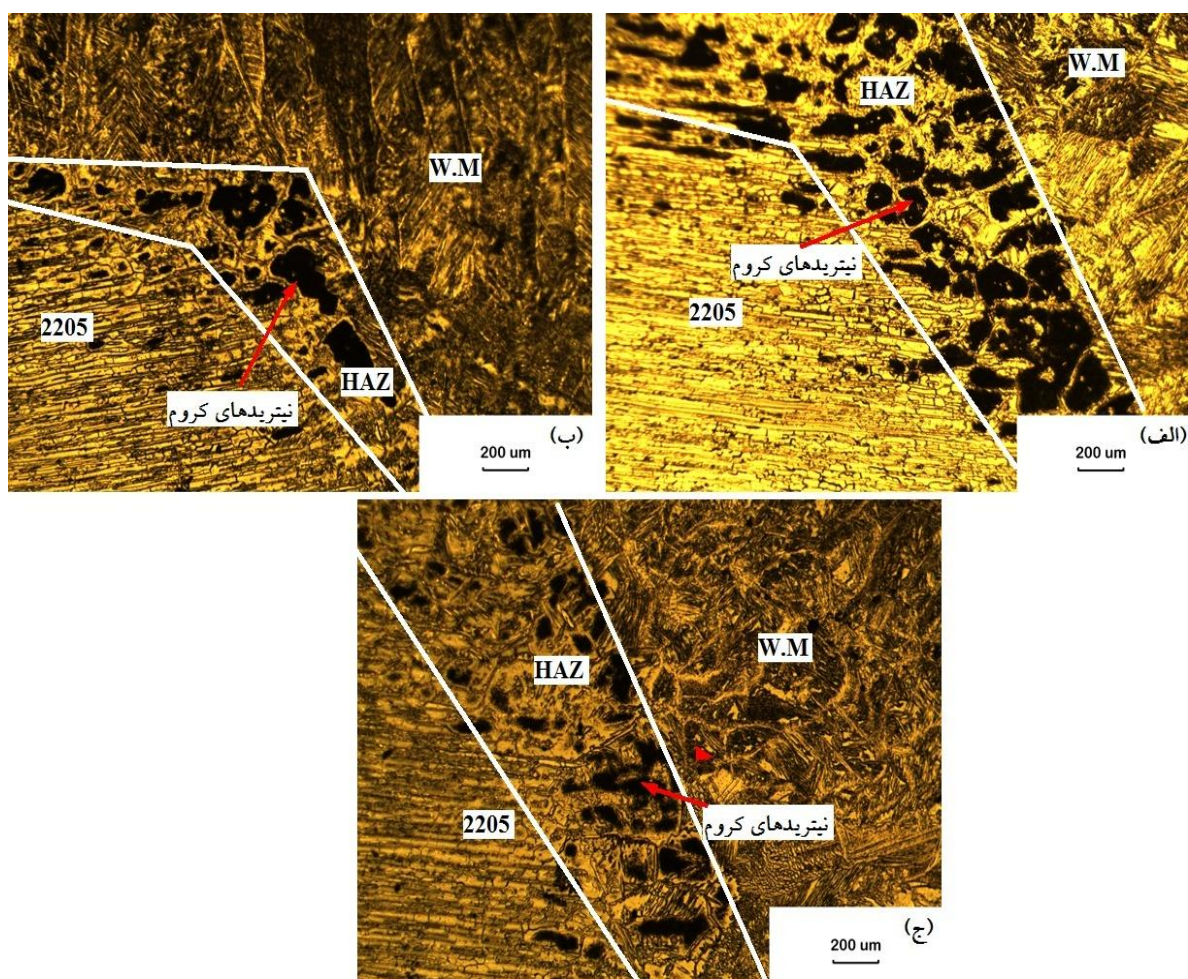


شکل (۴): تصویر مناطق متأثر از حرارت نمونه‌های A، B و C: (الف): منطقه متأثر از حرارت فولاد زنگ‌نزن آستنیتی نمونه A، (ب): منطقه متأثر از حرارت فولاد زنگ‌نزن دوفازی نمونه A، (ج): منطقه متأثر از حرارت فولاد زنگ‌نزن آستنیتی نمونه B، (د): منطقه متأثر از حرارت فولاد زنگ‌نزن دوفازی نمونه B، (ه): منطقه متأثر از حرارت فولاد زنگ‌نزن آستنیتی نمونه C و (و): منطقه متأثر از حرارت فولاد زنگ‌نزن دوفازی نمونه C

داده است. بر اساس شکل ملاحظه می‌شود که در منطقه متأثر از حرارت فولاد زنگ‌نزن دوفازی، مقدار فریت به اندازه قابل توجهی افزایش یافته است. نرم افزار 3 Image tools مقدار فریت در منطقه متأثر از حرارت نمونه های A، B و C را به ترتیب $69/9\%$ ، $64/2\%$ و $61/1\%$ بر آورد کرده است. بر خلاف فلز جوش منطقه متأثر از حرارت تنها تحت تاثیر حرارت ورودی می‌باشد زیرا ضربات قوس هیچ تاثیری بر مقدار فریت ندارد و نمونه با نرخ سرمایش بالاتر، مقدار فریت بالاتری خواهد داشت.

با توجه به شکل ۳ مشاهده شد نمونه با حرارت ورودی بالا کمترین مقدار آستنیت (نمونه C) و نمونه A با کمترین حرارت ورودی بیشترین مقدار آستنیت را دارد و نمونه با حرارت ورودی میانگین (نمونه B) از نظر مقدار آستنیت در حد وسط قرار دارد. علت اصلی این تضاد در ارتباط با ریزدانه‌گی و تشکیل بیش از حد آستنیت درون دانه‌ای بوده است.

شکل ۴ تصویر متالوگرافی نوری مناطق متأثر از حرارت نمونه‌های A، B و C را در دو فلز پایه ۳۱۶L و ۲۲۰۵ را نشان

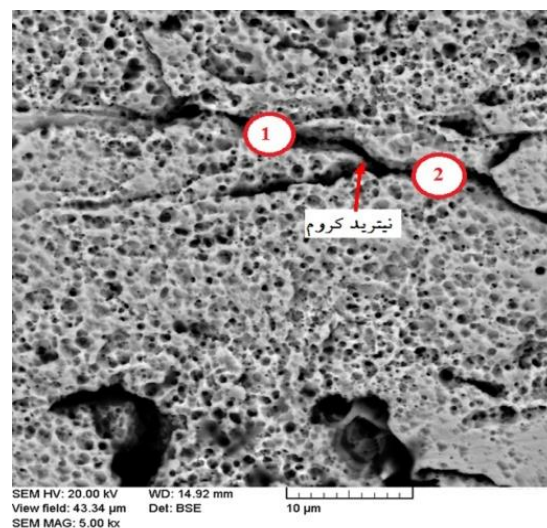


شکل (۵): مناطق سیاه رنگ موجود در منطقه متأثر از حرارت فولاد زنگ‌نزن دوفازی ۲۲۰۵: (الف): نمونه A، (ب): نمونه B و (ج): نمونه C

کمتری فاز سیاه رنگ تشکیل داده‌اند (شکل ۵).

بررسی نمونه‌ها با اسید اگزالیک نشان داد نمونه A با نرخ سرمایش بسیار بالا مقدار زیادی سیاه رنگ تشکیل داده است و نمونه B و C با حرارت ورودی بیشتر نسبت به نمونه A مقدار

به دلیل رنگ سیاه مستعد به حضور فاز سیگما هستند. این فازها در مرز مشترک فریت - فریت و مرز آستنیت - فریت تشکیل می‌شوند. فاز سیگما تاثیر بسیار مضر بر خواص مکانیکی و خواص خوردگی فولاد دوفازی دارد. از نقاط مشخص شده در شکل ۸ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی تهیه شد، و آنالیز نقاط مشخص شده در شکل ۸ در جدول ۵ آمده است مراجع بسیاری حضور فاز سیاه رنگ در مرز فریت - آستنیت اچ شده با محلول KOH را که محتوی مولیبدن و کروم بالاتر از ترکیب اسمی فلز باشد را دال بر حضور فاز سیگما می‌دانند [۱۰، ۱۵، ۶].



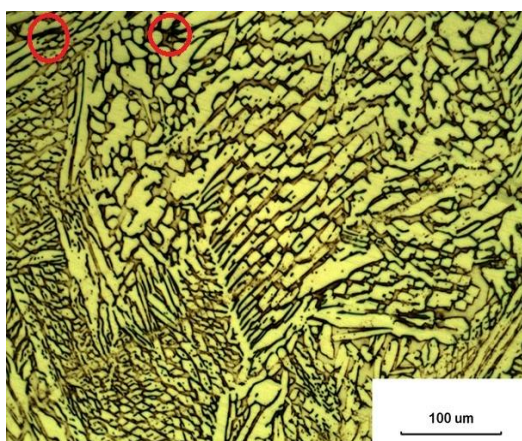
شکل (۶): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه A

از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز EDS مشخص شد که این فازها، نیتريد کروم می‌باشند مراجع بسیاری این فازهای سیاه را نیتريد کروم معرفی نموده و با توجه به عدم توانایی میکروآنالیز در تشخیص عنصر نیتروژن، افزایش مقدار عنصر کروم دال بر وجود این فازها می‌باشد [۱۰، ۶، ۱، ۱۲، ۱۴]. نیتريد های کروم علاوه بر کاهش مقاومت به حفره دار شدن خود به عنوان مراکز جوانه زنی ترک عمل می‌کنند. شکل ۶ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه‌های A و جدول ۴ ترکیب نقاط مشخص شده در شکل را نشان داده است.

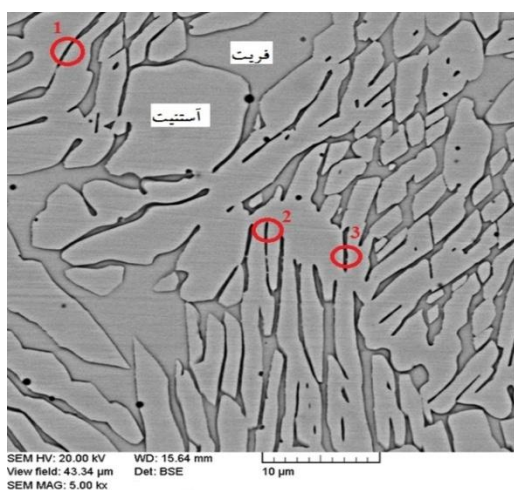
جدول (۴): آنالیز شیمیایی نقاط مشخص شده در شکل ۶ (بر اساس درصد وزنی)

نقاط	Cr
۱	۲۸/۸
۲	۲۷/۴

نمونه C به دلیل بالا بودن حرارت ورودی مستعدترین نمونه جهت حضور فاز ترد و شکننده سیگما می‌باشد. این فاز در نرخ سرمایش‌های آهسته در فولادهای زنگ‌نزن دوفازی تشکیل می‌شود [۱۱]، لذا تصویر متالوگرافی نوری با استفاده از محلول KOH تهیه شد. نقاط سیاه رنگ مشخص شده در شکل ۷ نقاط



شکل (۷): تصویر متالوگرافی نوری با محلول KOH نمونه C



شکل (۸): تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از شکل ۷

ورودی متوسط افت بسیار شدید مقاومت به حفره‌دار شدن را از خود نشان داده است. لذا افت یا افزایش مقاومت به حفره‌دار شدن نسبتی با حرارت ورودی ندارد و پدیده دیگری بر این عامل اثر گذار است.

جدول (۶)؛ مقادیر E_{pit} فلز جوش نمونه‌های A، B و C

نمونه	E_{pit} (V vs. SCE)
A	۰/۹
B	۰/۶۸
C	۰/۹۹

با مراجعه به جدول ۳ مشاهده می‌شود که نمونه C از نظر ریزدانه‌گی در حد وسط دو نمونه دیگر قرار دارد و از نظر تناسب فازی به ساختار ۵۰ - ۵۰ بسیار نزدیک است و نمونه A بسیار ریزدانه است و ساختاری با انحراف زیاد از نسبت ۵۰ - ۵۰ دارد و نمونه B با دانه‌های بسیار درشت و انحراف زیاد از نسبت مساوی فاز فریت/آستینیت دارای افت شدید مقاومت به حفره‌دار شدن بوده است.

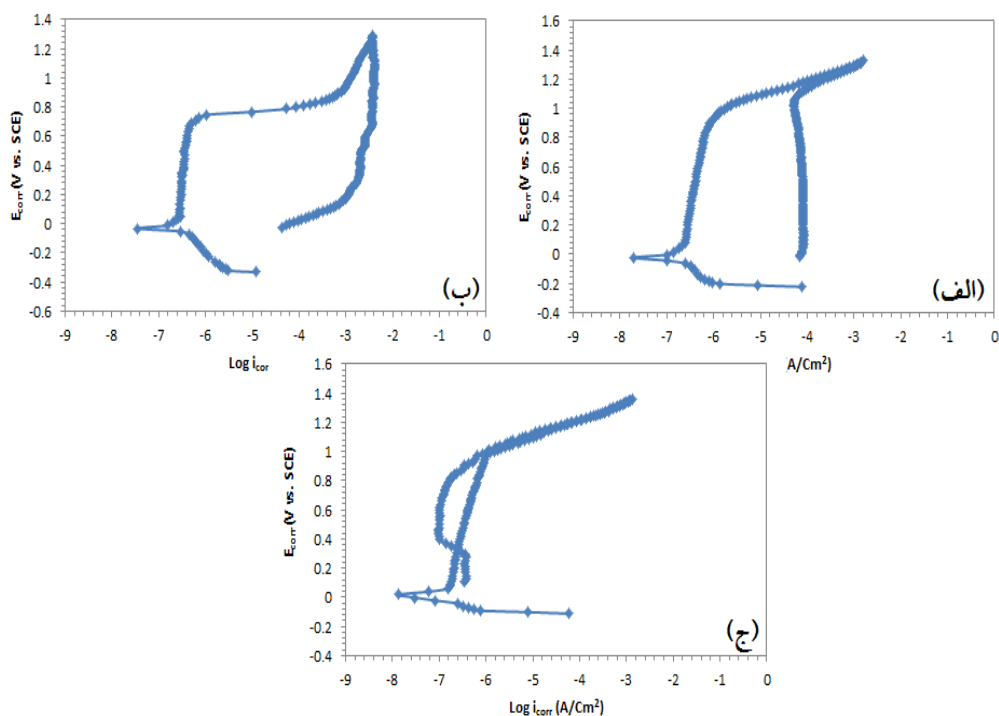
جدول (۵): آنالیز EDS از نقاط مشخص شده در شکل ۸ (بر اساس درصد وزنی)

نقاط	Cr	Mo
۱	۲۰/۲	۳/۴
۲	۱۸/۳	۲/۵
۳	۱۶/۸	۲/۲

بر اساس نتایج بدست آمده از آنالیز EDS مشخص شد که نمونه با حرارت ورودی بالا (نمونه C) هیچ فاز سیگمایی تشکیل نداده است زیرا فاز سیگما فازی غنی از عنصر کروم و مولیبدن می‌باشد که در حدود ۱۲٪ مولیبدن و ۳۳٪ کروم دارد [۱، ۶، ۱۰].

۳-۲- بررسی مقاومت به خوردگی

شکل ۹ نمودارهای آزمون پلاریزاسیون سیکیلی برای نمونه‌های A، B و C را در پاس ریشه نشان می‌دهد و جدول ۶ مقادیر E_{pit} را برای این نمونه‌ها نشان داده است. بر اساس شکل ۸ و جدول ۶ مشاهده می‌شود که نمونه با حرارت ورودی بالا، بیشترین مقاومت به حفره‌دار شدن را دارد و نمونه‌ی با حرارت ورودی کم بعد از آن قرار دارد و این در حالی است که نمونه با حرارت



شکل (۹): نمودار پلاریزاسیون سیکیلی فلز جوش نمونه‌های A، B و C: (الف): نمونه A، (ب): نمونه B و (ج): نمونه C

- [4] M. Conradi, P. M. Schon, A. Kocijan & M. Jenko, G. J. Vancso, "Surface analysis of localized corrosion of austenitic 316L and duplex 2205 stainless steels in simulated body solutions", *Mater ChemPhys*, Vol. 130, pp. 708-713, 2011.
- [5] P. D. Teidra & O. Martin, "Effect of welding on the stress corrosion cracking behaviour of prior cold worked AISI 316L stainless steel studied by using the slow strain rate test", *Mater Des*, Vol. 49, pp. 103-109, 2013.
- [6] M. Yosefiyh, M. Shamanian & A. Saatchi, "Optimization of the pulsed current gas tungsten arc welding (PCGTAW) parameters for corrosion resistance of super duplex stainless steel (UNS S32760) welds using the Taguchi method", *J Alloys Compd*, Vol. 509, pp. 782-788, 2011.
- [7] L. Chen, H. Tan, Z. Wang, J. Li & Y. Jiang, "Influence of cooling rate on microstructure evolution and pitting corrosion resistance in the simulated heat-affected zone of 2304 duplex stainless steels", *Corrosion Science*, Vol. 54, pp. 1585-1591, 2012.
- [8] J. Labanowski, "Stress corrosion cracking susceptibility of dissimilar stainless steels welded joints", *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 20, No. 1-2, pp. 255 - 258, 2007.
- [9] S. H. Wang, P. K. Chiu, J. R. Yang & J. Fang, "Gamma phase transformation in pulsed GTAW weld metal of duplex stainless steel", *Mater SciEng*, Vol. A420, pp. 26-33, 2006.
- [10] M. Yosefiyh, M. Shamanian & A. Saatchi, "Influence of Heat Input in Pulsed Current GTXW Process on Microstructure and Corrosion Resistance of Duplex Stainless Steel Welds", *J Iron Steel Res Int*, Vol. 18, pp. 65-69, 2011.
- [11] H. Sieurin & R. Sandstrom, "Sigma phase precipitation in duplex stainless steel 2205", *Mater SciEng*, Vol. A444, pp. 271-276, 2007.
- [12] J. Liao, "Nitride Precipitation in Weld HAZs of a Duplex Stainless Steel", *the Iron and Steel Institute of Japan International*, Vol. 5, No. 41, pp. 460-467, 2001.
- [13] N. Sathirachinda, R. Pettersson, R. Wessman, U. Kivisakk & A. Pan, "Scanning Kelvin probe

تشکیل لایه‌های روئین در فلزات ریزدانه بسیار راحت‌تر از فلزات درشت دانه انجام می‌شود و از طرفی دیگر در فلزات با دو فاز مختلف یک فاز آند و فاز دیگر کاتد خواهد شد یعنی یک فاز مصرف و فاز دیگر محافظت می‌شود هرچه نسبت این دو فاز مساوی‌تر باشد خوردگی کمتر خواهد بود لذا افزایش مقاومت به حفره دار شدن از طریق ریزدانه‌گی مناسب و نسبت نزدیک‌تر فاز فریت/آستنیت به نسبت ۵۰٪ - ۵۰٪ در نمونه C توجیه پذیر است [۱۶]. به طور کلی تناسب فازی و دانه‌بندی ریز سبب بهبود خواص مکانیکی و خوردگی فلز جوش می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

- ۱- نسبت فاز آستنیت/فریت فلز جوش از پاس ریشه تا پاس رویه به دلیل رقت متفاوت و حرارت ورودی متفاوت متغیر است.
- ۲- حرارت ورودی در ریز ساختار فلز جوش تاثیر چندانی ندارد و عامل کلیدی در تعیین ریزساختار فلز جوش پارامترهای پالسی به ویژه فرکانس می‌باشند.
- ۳- حرارت ورودی تاثیر به سزایی در تشکیل نیتريد های کروم در منطقه متأثر از حرارت فولاد زنگ‌نزن دوفازی دارد.
- ۴- مقاومت به حفره دار شدن تحت تاثیر پارامتر فرکانس می‌باشد به صورتی که با افزایش فرکانس مقاومت به حفره دار شدن افزایش خواهد یافت البته تا حدی که افزایش فرکانس منجر به تشکیل بیش از حد آستنیت نشود.

۵- مراجع

- [۱] م. شمعیان و م. رحمتی، "متالورژی جوشکاری و جوش‌پذیری فولادهای زنگ‌نزن"، جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان، ص ۱۹۱-۲۱۳، بهار ۱۳۸۹.
- [2] M. MCGuire, "Stainless steels for design engineers", ASM, pp. 60-80, 2008.
- [3] M. Dadfar, M. H. Fathi, F. Karimzadeh, M. R. Dadfar & A. Saatchi, "Effect of TIG welding on corrosion behavior of 316L stainless steel", *Mater Letters*, Vol. 61, pp. 2343-2346, 2007.

- [15] S. Topolska & J. Labanowski, "Effect of microstructure on impact toughness of duplex and superduplex stainless steels", Vol. 36, No. 2, pp. 142 – 149, 2009.
- [16] S. Wang, Q. Ma & Y. Li, "Characterization of microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of dissimilar welded joint between 2205 duplex stainless steel and 16MnR", Mater Des, Vol. 32, pp. 831-837, 2011.
- force microscopy study of chromium nitrides in 2507 super duplex stainless steel-Implications and limitations", ElectrochimicaActa, Vol. 56, pp. 1792–1798, 2011.
- [14] A. J. Ramirez, S. Brandi & J. C. Lippold, "The relationship between chromium nitride and secondary austenite precipitation in duplex stainless steels. Metallurgical Transactions A", Vol. 34A, No. 8, pp. 1575-1597, 2003.